

Ispesl

Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome

SECONDO LIVELLO

SCHEDE DI

APPROFONDIMENTO

SCHEDA 1

PROPAGAZIONE DEL RUMORE IN AMBIENTI CHIUSI: ASPETTI FISICI

All'aperto il suono emesso da una sorgente raggiunge il punto di ricezione mediante il solo suono diretto (condizione denominata di "campo libero").

In un ambiente chiuso il suono emesso da una sorgente raggiunge il punto di ricezione non solo mediante il suono diretto ma anche attraverso le innumerevoli riflessioni che le onde sonore compiono sulle pareti dell'ambiente e che raggiungono con ritardi di tempo crescenti il medesimo ricevitore.

Nella posizione di ricezione, come in tutti gli altri punti interni all'ambiente, il suono subisce due modificazioni fondamentali:

- i suoni sono percepiti con una coda riverberante;
- il livello sonoro è maggiore rispetto al campo libero (a parità di distanza dalla sorgente sonora).

Entrambi questi due effetti sono fisicamente descrivibili facendo ricorso alle proprietà acustiche delle superfici delimitanti l'ambiente ed al volume dell'ambiente stesso.

In particolare ad ogni superficie dell'ambiente (o ad ogni porzione di essa) S_i si associa una grandezza denominata "assorbimento acustico" (α_i) che descrive le proprietà fisiche della superficie rispetto al suono su di essa incidente. Un valore pari all'unità, ($\alpha_i = 1$), corrisponde al massimo assorbimento acustico, mentre un valore prossimo a zero ($\alpha_i = 0$) indica scarso assorbimento e, conseguentemente, la proprietà della superficie di riflettere quasi integralmente le onde sonore.

Il tempo di riverberazione nell'ambiente, indicato con T_{60} o anche con RT , espresso in secondi, è calcolabile mediante la formula di Sabine espressa dalla relazione:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{\sum_i \alpha_i S_i + \sum_j x_j} \quad [\text{s}] \quad (1)$$

dove V è il volume dell'ambiente; la sommatoria \sum_i è estesa a tutte le superfici fisse di contorno, pavimento e soffitto inclusi, mentre la sommatoria \sum_j tiene conto dell'assorbimento di tutte le superfici mobili comprese le persone (se presenti).

Dal punto di vista sperimentale T_{60} è definito come il tempo impiegato dall'intensità sonora a ridursi fino ad un milionesimo del suo valore iniziale (ovvero di 60 dB). Questo parametro è misurabile secondo tecniche diverse: rumore interrotto, rumore impulsivo, *sweep* sinusoidale.

In un ambiente di lavoro una maggiore riverberazione determina un rumore di livello più elevato e quindi va considerata in termini negativi.

Per gli ambienti chiusi è stata formulata la seguente relazione:

$$L_p = L_w + 10 \text{Log} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

$$\text{con } R = \frac{\bar{\alpha} S_t}{1 - \bar{\alpha}} \quad (3)$$

in cui il livello sonoro L_p in una posizione interna all'ambiente è messo in relazione con il livello di potenza sonora che caratterizza la sorgente (L_w), con la sua direttività Q e con le caratteristiche acustiche delle superfici di contorno R .

Nella (2) r è la distanza tra la sorgente ed il ricevitore, nella (3) S_t è la superficie totale interna dell'ambiente e $\bar{\alpha}$ è una media pesata dei coefficienti di assorbimento. La quantità R è denominata costante dell'ambiente.

L'andamento del livello sonoro determinato dalla relazione (2) è riportato per diversi valori della costante dell'ambiente R nella Figura 1.1.

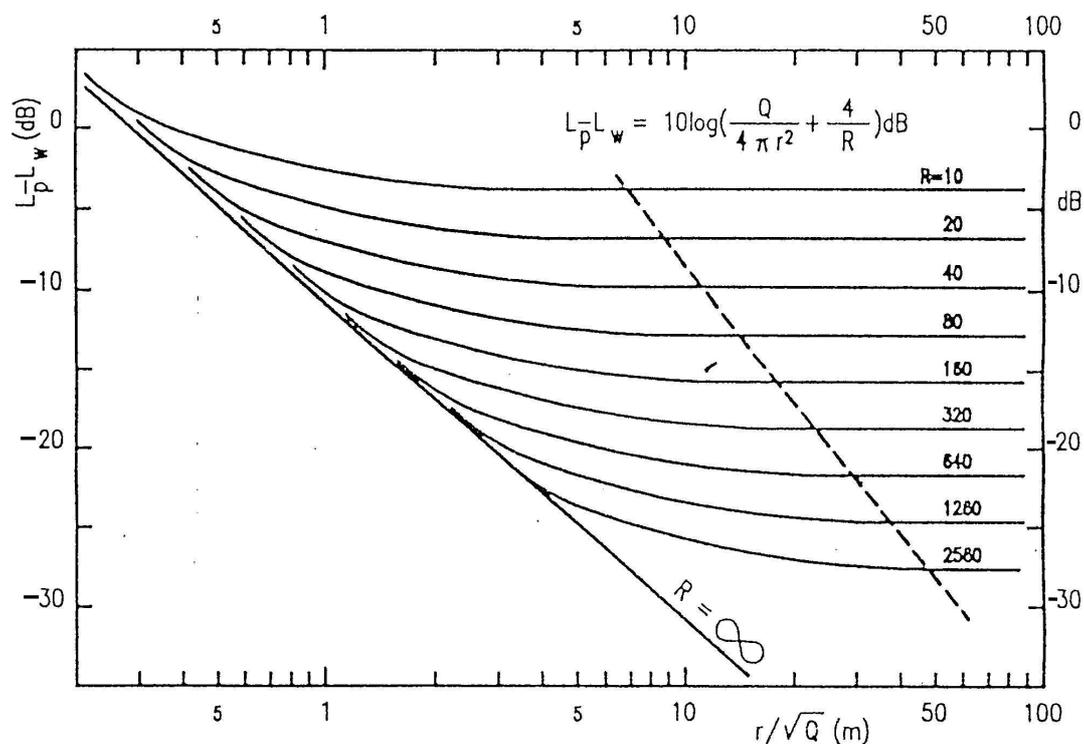


Figura 1.1 - Andamento della differenza tra livello di potenza della sorgente e livello sonoro a distanza r per valori crescenti della costante ambientale

Nella zona vicina alla sorgente sonora (“campo vicino”) prevale il livello del suono diretto dalla sorgente al ricevitore. Questo corrisponde al primo termine in parentesi nell’equazione (2) $\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$ che implica un decremento del livello sonoro di 6 dB per un raddoppio di distanza dalla sorgente. Allontanandosi dalla sorgente acquista rilevanza il “campo riverberante”, ovvero il contributo al livello totale dato dall’accumularsi successivo delle riflessioni sonore. Questo contributo, che è descritto nel secondo termine in parentesi dell’equazione (2) $\left(\frac{4}{R}\right)$ non dipende dalla distanza sicché, oltre una definita distanza (raggio critico), esso è preminente. Il raggio critico separa quindi il campo diretto da quello riverberante e a grandi distanze il campo complessivo risulterà costante.

Le formule previsionali per il tempo di riverberazione (1) e per il livello sonoro (2) sono valide per ambienti le cui dimensioni (altezza, lunghezza, larghezza) non siano troppo dissimili tra loro e nei casi in cui l’assorbimento acustico sia distribuito in maniera uniforme sulle diverse superfici (ambienti sabiniani). Viene inoltre trascurato l’assorbimento dell’aria, che va considerato invece in ambienti di grandi dimensioni.

In realtà, esistono ambienti industriali che differiscono dalle ipotesi sabiniane, ad esempio:

1. ambienti bassi e vasti (ad esempio, stabilimenti tessili): in essi le riflessioni multiple si indirizzano sull'asse ortogonale al pavimento ed al soffitto;
2. ambienti lunghi (tunnel o corridoi): in questi le riflessioni si distribuiscono nel piano ortogonale all'asse maggiore;
3. ambienti con pavimento e soffitto fortemente assorbenti (ad esempio, sale da conferenza): in questo caso le riflessioni provengono principalmente dalle pareti laterali.

Per queste tipologie di ambienti sono state sviluppate diverse metodiche previsionali che si discostano in maniera più o meno marcata da quelle caratteristiche degli ambienti sabiniani. Negli ambienti industriali l'allestimento interno (macchine, impianti, ecc.) può di volta in volta favorire la propagazione del rumore o sfavorirla. Per caratterizzare il livello sonoro sono generalmente riportati due parametri noti come DL_f e DL_2 . Il primo misura l'aumento del livello sonoro rispetto al livello prodotto dalla medesima sorgente in campo libero, mentre il secondo costituisce il decremento del livello sonoro per il raddoppio della distanza. Tramite questi due parametri si riesce a descrivere una curva misurata sperimentalmente nell'ambiente, nota come "curva di propagazione del suono", che riporta il livello sonoro misurato in ragione della distanza dalla sorgente sonora (Figura 1.2).

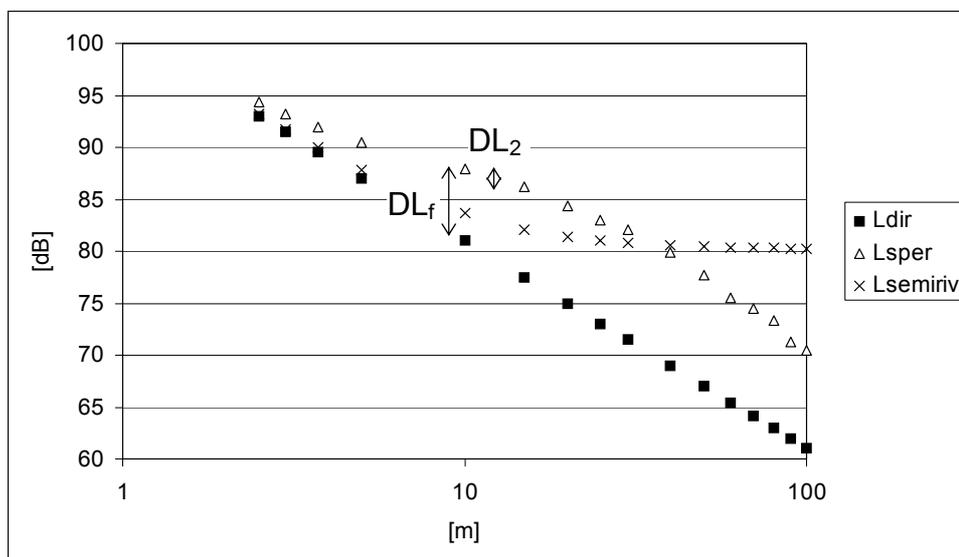


Figura 1.2: Decremento del livello sonoro con la distanza in un ambiente industriale

Nel caso in cui si possa tracciare una curva valida per tutto l'ambiente, i valori dei parametri DL_f e DL_2 rientrano solitamente tra quelli riportati nella Tabella 1.1.

Tabella 1.1: Valori tipici per i parametri DL_f e DL_2 negli ambienti industriali

	Campo vicino	Distanze medie	Campo lontano
DL_f	~ 0 dB	2 ~ 10 dB	< 5 ~ 10 dB
DL_2	5 ~ 6 dB	2 ~ 5 dB	> 6 dB

Inoltre secondo la norma UNI EN ISO 11690-3:2000 a grandi distanze dalla sorgente l'effetto di schermatura, densità e assorbimento degli allestimenti può in alcuni casi produrre un $DL_2 < 0$ dB.

Negli ambienti industriali vi è quindi una zona a distanza intermedia, in cui il livello sonoro è maggiore di quello previsto dalle formula del campo semi-riverberante (formula 2), mentre per grandi distanze tale livello è decisamente inferiore rispetto a quello previsto.

Per prevedere il livello sonoro negli ambienti industriali in vista della loro bonifica acustica sono state sviluppate diverse formule sia analitiche che empiriche o semi-empiriche, più o meno complesse. In particolare è prassi comune considerare che gli elementi interni all'ambiente contribuiscano a rendere le riflessioni sonore "diffuse". Questo vale sia per il pavimento dove sono installati i macchinari e dove permangono i materiali, sia per il soffitto nel caso esso sia di profilo irregolare. Tra le molte formule derivate si ricorda specialmente quella dovuta a Kuttruff:

$$L_p = L_w + 10 \text{Log} \left\{ \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{(1-\bar{\alpha})}{\pi h^2} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{r^2}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}} + b \frac{(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}} \frac{1}{\left(b^2 + \frac{r^2}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \right] \right\} \quad (4)$$

dove Q è la direttività della sorgente, h è l'altezza dell'ambiente, r è la distanza sorgente-ricevitore, $\bar{\alpha}$ è il coefficiente di assorbimento medio tra pavimento e soffitto e b si ricava dai dati seguenti:

Tabella 1.2: Valori sperimentali del parametro b da inserire nella formula (4) al variare di $\bar{\alpha}$ (tratto da Kuttruff H., *Sound propagation in working environments*, Proc. 5th FASE Symposium, Thessaloniki 1985)

$\bar{\alpha}$	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
b	3.03	2.165	1.843	1.665	1.551

Questa formula è in grado di prevedere con sufficiente precisione i valori del livello sonoro in un'ampia casistica di ambienti industriali.

SCHEDA 2**PROPAGAZIONE DEL RUMORE IN AMBIENTI INDUSTRIALI: MODELLIZZAZIONE**

La modellizzazione acustica degli ambienti chiusi può essere sviluppata mediante programmi di simulazione acustica. Si tratta di modelli tridimensionali (CAD acustici) che considerano le proprietà acustiche dei materiali di contorno e che consentono di inserire nel modello sorgenti sonore e ricevitori. Un modello di questo tipo è mostrato nella Figura 2.1.

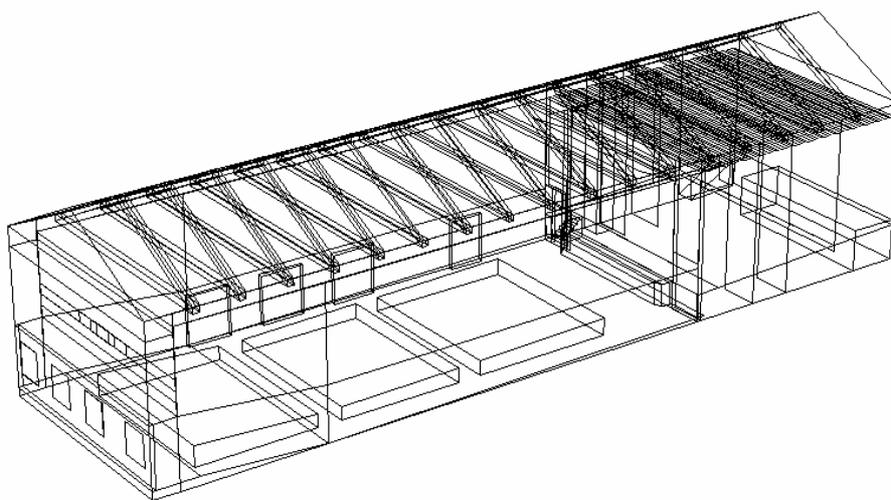


Figura 2.1 - Modello di una sala sviluppato su CAD acustico.

In questi modelli le componenti architettoniche del locale sono descritte con un grado di dettaglio che trascura in genere le parti più minute: questo succede sia per limitare il tempo di calcolo sia per le approssimazioni insite negli algoritmi di calcolo. Questi possono essere di natura geometrica o statistica (o entrambe). Per il loro funzionamento è necessario conoscere (o assegnare) i coefficienti di assorbimento di tutte le superfici che compongono il modello, descrivere fisicamente la sorgente sonora riguardo a potenza emessa e direzionalità e sistemare i ricevitori in punti significativi.

In diversi casi, l'inserimento dei dati acustici relativi ai materiali di contorno delle superfici ed agli equipaggiamenti è spesso arduo poiché è assai difficile disporre di dati attendibili. Anche l'effetto schermante e diffondente delle attrezzature deve essere accuratamente verificato prima dell'immissione dei relativi dati nel modello di calcolo. In mancanza di una verifica si può incorrere in errori grossolani.

In Figura 2.2 è riportato un confronto tra dati di simulazione (ottenuti mediante il software Ramsete) e quelli sperimentali.

Per il motivo sopra indicato i modelli di simulazione sono più affidabili per le modifiche piuttosto che per la progettazione ex-novo. Nel primo caso infatti il modello di calcolo può essere tarato sui dati di misura aggiustando alcuni coefficienti dei materiali o intervenendo su coefficienti ad hoc.

E' bene tenere presente che la predisposizione di un modello per un tipico ambiente industriale risulta onerosa in termini di tempo.

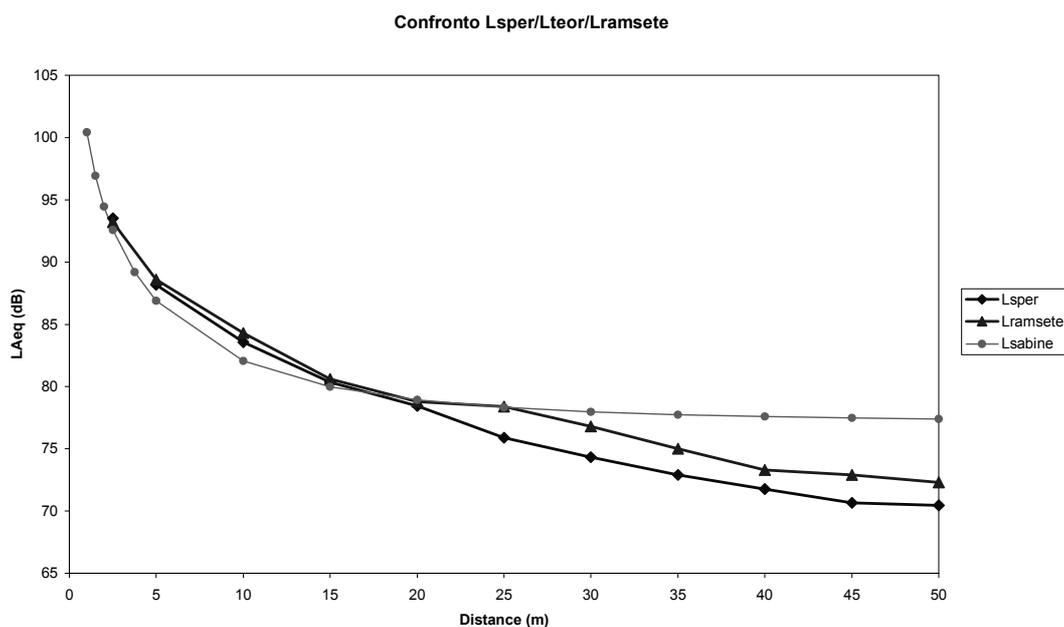


Figura 2.2 - Confronto tra i dati di simulazione e quelli sperimentali

Come prodotto della simulazione, dai modelli di calcolo si ottiene la risposta all'impulso energetica dell'ambiente. Questa funzione, diversa da punto a punto, caratterizza completamente le condizioni acustiche dell'ambiente. Da essa sono poi estratti i parametri quali il tempo di riverberazione, il livello di pressione sonora ed altri che in ciascun punto specificano nei dettagli le diverse condizioni di ricezione.

Nella Figura 2.3 è riportata la risposta energetica all'impulso in una posizione al centro della sala simulata allo stato di fatto e di progetto. Nel secondo caso si vede come la coda sonora sia più distesa con la conseguenza di un più lungo tempo di riverberazione.

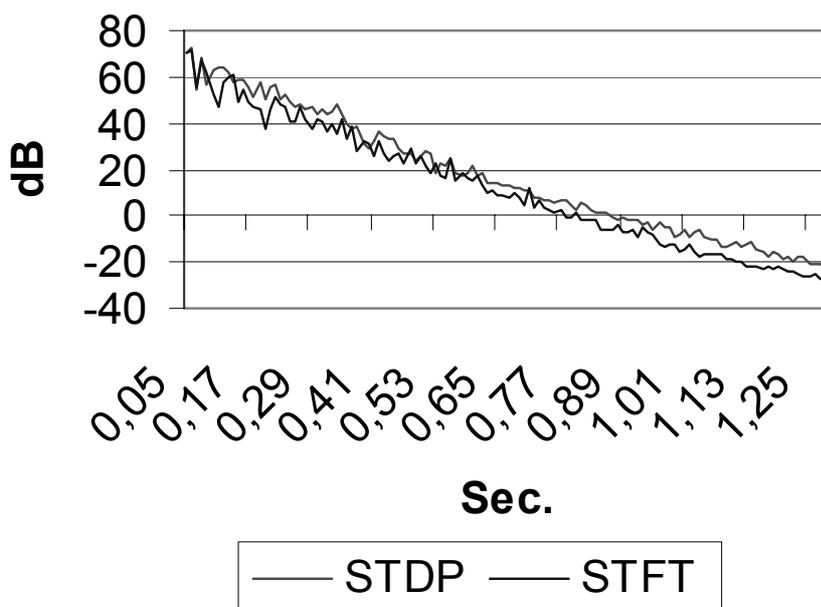


Figura 2.3 - Risposta all'impulso energetica simulata nello stato di fatto (STFT) e nello stato di progetto (STPG).

Programmi di simulazione commerciali

In commercio sono presenti alcuni programmi di simulazione (vedi [sezione B4](#) del Terzo Livello). In genere i software di modellizzazione di ambienti confinati si basano sulla tracciatura di raggi (*ray tracing*) o piramidi (*pyramid tracing*) o sul metodo delle *sorgenti immagine*, oppure su metodi ibridi. In alcuni casi è possibile tener conto dell'effetto di diffrazione sul bordo libero delle schermature o degli ostacoli e considerare la quota di energia che attraversa le superfici.

L'ambiente che si intende simulare può essere definito importando i dati geometrici disponibili in formato dxf (da AutoCAD 3D). In alternativa può essere definito ricostruendo la struttura dell'ambiente mediante CAD interno, lavorando contemporaneamente su più finestre (con vista in pianta, sezioni ed assonometria) ed introducendo i principali elementi geometrici (pavimento, pareti, tetti, porte, finestre, ecc., sorgenti e ricevitori); alle sorgenti direttive può essere assegnato un orientamento. E' possibile inserire anche porte, finestre, aperture per ricambi d'aria, ecc. (Figura 2.4).

Per quanto riguarda le sorgenti (Figura 2.5) possono essere importate direttamente le misure utili per la determinazione della loro potenza sonora. Si può determinare e visualizzare la direttività delle sorgenti.

Per quanto riguarda i materiali di rivestimento e di isolamento vengono fornite librerie contenenti i dati acustici di svariati materiali alle diverse bande di frequenza; tali librerie possono accogliere i dati specifici inseriti dall'utente.

Modificando i materiali di rivestimento è possibile valutare direttamente l'adeguatezza degli interventi di trattamento fonoassorbente delle pareti. Si possono simulare interventi acustici di insonorizzazione delle sorgenti mediante coperture integrali o parziali (sorgenti monopermeabili).

La visualizzazione interattiva mostra la geometria, i materiali e la posizione delle sorgenti in un ambiente tridimensionale (3D). Ad ogni superficie può essere assegnato un colore diverso in base al differente coefficiente di assorbimento.

Per quanto riguarda i risultati, essi possono essere molteplici:

- risposta singola, sorgente – ricevitore;
- risposta multipla, sorgenti – ricevitori;
- tempo di riverberazione basato su ipotesi e formule differenti;
- visualizzazione dinamica e tridimensionale dei raggi di riflessione durante il calcolo;
- livelli sonori in banda larga (Lin o A) o per bande di ottava in qualsiasi punto dell'ambiente;
- mappa dei livelli sonori basata su una griglia di punti (Figura 2.6).

E' possibile calcolare numerosi parametri: Livello di Pressione Sonora lineare (SPL) e ponderato A (SPL(A)), *Rate of Spatial Decay* (DL₂), Tempo di Riverberazione (T₃₀), *Early Decay Time* (EDT), *Speech Transmission Index* (STI), *Centre Time* (CT), Livello riferito a 10 m in campo libero (G).

I risultati possono essere stampati, copiati sulla clipboard di Windows, esportati in molti formati numerici (WMF, EMF, BMP, GIF, JPG). I risultati, inclusi i parametri calcolati, i dati di riflessione, le curve, ecc., possono essere esportati in formato ASCII.

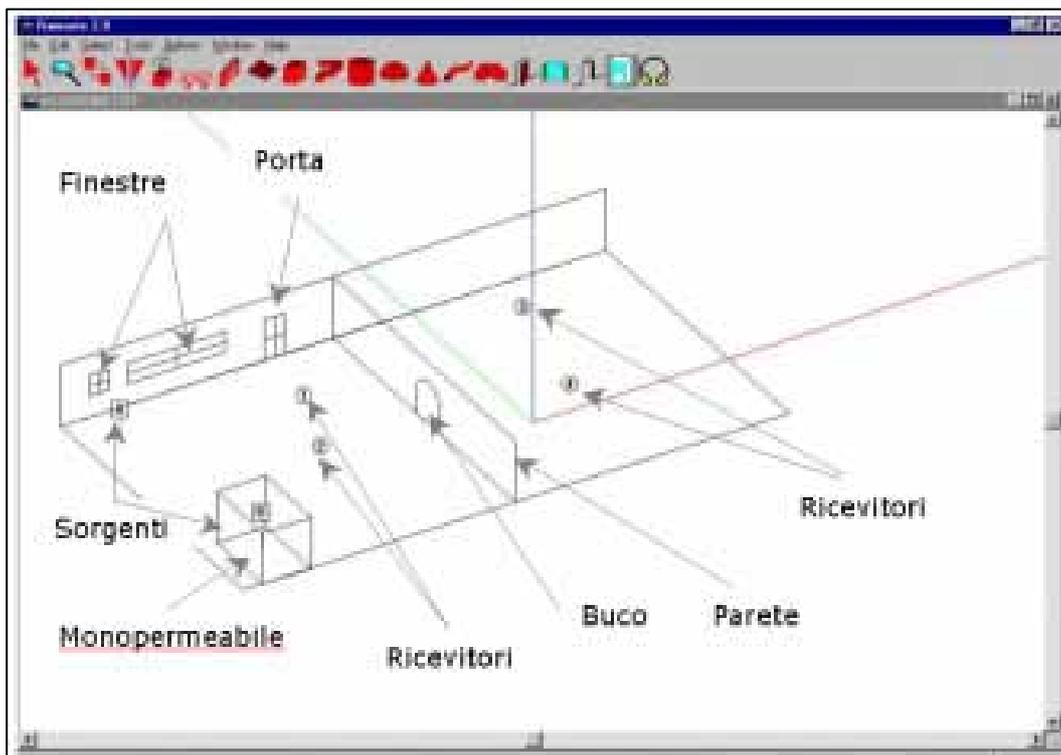


Figura 2.4 : Modellizzazione semplificata di uno stabilimento industriale

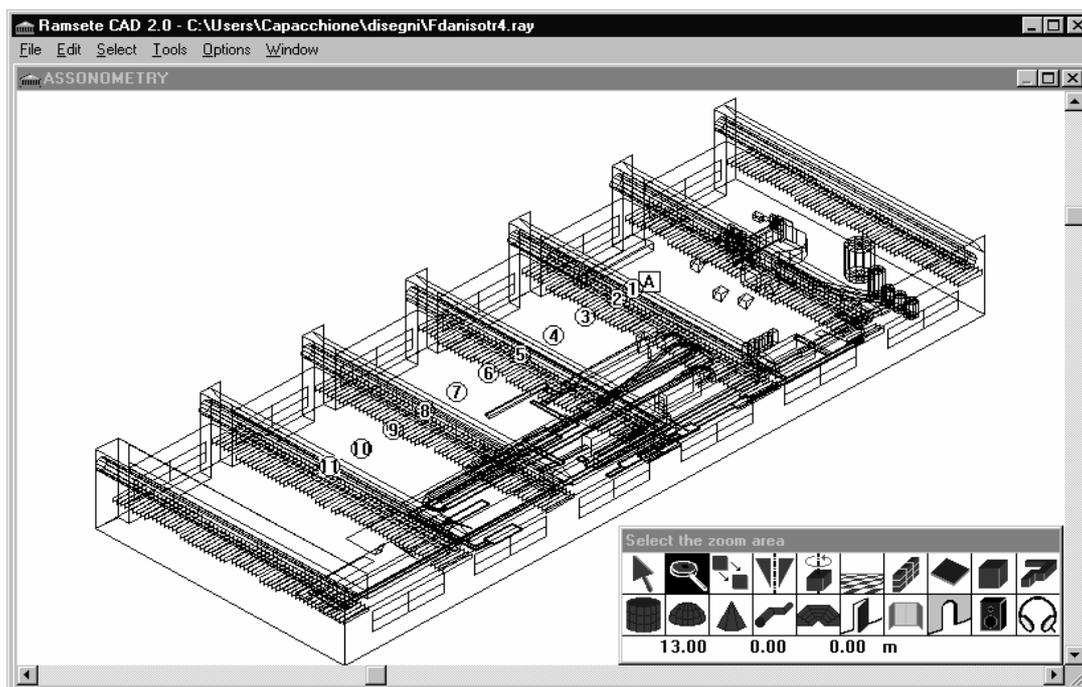


Figura 2.5 : Modello CAD acustico di uno stabilimento industriale con sorgenti e ricevitori

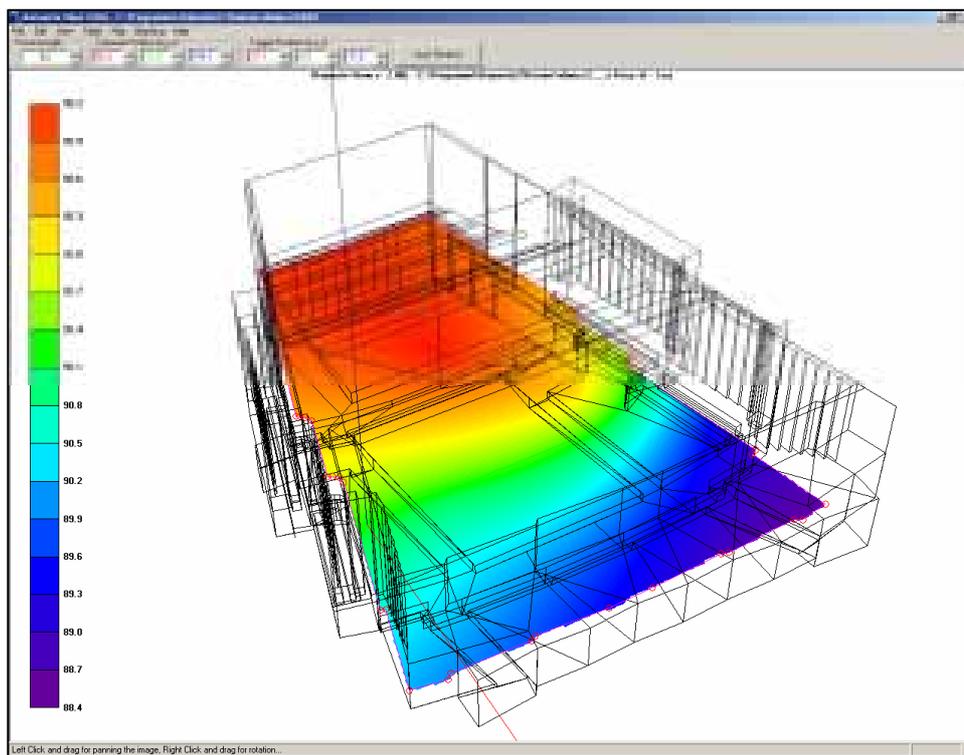


Figura 2.6 : Visualizzazione di una mappatura acustica